

ОСОБЕННОСТИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛАХ

Ю. А. Осокин

Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова
г. Барнаул

Теплопередача в сыпучих материалах определяется комплексом тепловых процессов: радиационного, конвективного и внутренней теплопроводности.

Внутренняя теплопередача производится от одной контактной поверхности к внутренним структурам материала, характеризующимся иной температурой, и от них теплопередачей к другим поверхностям

Контактная теплопроводность сыпучих материалов определяется:

- формой и размерами
- контактным напряжением;
- коэффициентом торцевого сопряжения (перекрытия);
- теплопроводными свойствами материала.

Свойства контактного обмена определяются межэлементными контактными напряжениями σ_k , которые зависят от формам сопрягаемых поверхностей, например, радиусов сфер R_1 и R_2 , физических параметров E_1 и E_2 , характеризующих свойства противостоять деформации при действии внешних сил, величины внешних сил N :

$$\sigma_k = k_{сж} (N E_{пр}^2 / R_{пр}^2)^{1/3},$$

где $k_{сж}$ – постоянный коэффициент, величиной от 0,3 до 1,0; $E_{пр} = 2 E_1 E_2 / (E_1 + E_2)$ – приведенное значение модулей упругости. При однородности сыпучих элементов $E_{пр} = E_1 = E_2$; $R_{пр}$ – приведенное значение радиусов контактных поверхностей; $R_{пр} = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$.

В случае контакта элемента сферической формы с плоской поверхностью $R_2 = \infty$ (см. рисунок 1) $R_{пр} = R_1$.

Размеры контактной поверхности характеризуются площадью напряженного контакта и коэффициентом контактно-деформационного перекрытия.

Площадь напряженного контакта определяется:

$$S = \pi k (N R_{пр} / E_{пр})^{2/3},$$

где $k = 1, 2 \dots 1, 3$

Контактно-деформационное перекрытие можно определить введением параметра активной части (контактной линии):

$$L = (r_{11} - r_{10})^{1/2} + (r_{21} - r_{20})^{1/2} - (\sqrt{2} / 2) a,$$

где a – межцентровое расстояние, r_{11} , r_{21} радиусы недеформированной поверхности, r_{10} ,

r_{20} – радиусы деформированной поверхности, находящейся в контактном сопряжении.



Рисунок 1 – Типовой вариант расположения сыпучих материалов (зерна) на плоской поверхности

В процессе теплообмена увеличение контактных напряжений увеличивает тепловую проводимость пропорционально произведению $\sigma_k S$.

Величина потока тепловой энергии (мощности, Вт) при теплообмене описывается известным выражением:

$$\Phi = \alpha_k \cdot S \cdot \Delta \theta,$$

где α_k коэффициент пропорциональности:

при теплообмене – α_k , при теплопроводности

– α_T ; при теплоотдаче излучением – $\alpha_{изл}$,

$$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Параметр $\Delta \theta = \Delta t^0$ – перепад температур между двумя изотермическими поверхностями или телами.

В режиме теплопроводности при коэффициенте теплопроводности λ материала и толщине δ , м

$$\Phi = \frac{\lambda \cdot S}{\delta} \cdot \Delta \theta = \sigma \Delta \theta$$

где S – площадь, σ – тепловая проводимость).

При конвективном режиме оценка теплообмена производится с учетом критериев Нуссельта (Nu), Грассгофа (Gr), Прандтля (Pr) и др. В ряде случаев взаимовлияние этих критериев выражается степенным критериальным уравнением:

$$Nu = c \cdot Re^q \cdot Pr^m \cdot Gr^n \cdot K_{дон} = \lambda_k.$$

В условиях естественной конвекции в достаточно большом объеме на уровне моря с размером теплоизлучателей до 30 см, перепадом температур до $\Delta\theta = 50K$ ($Q_{ср}=273K$), критериальное уравнение может иметь вид:

$$Nu = 0.135 Re^{0.033} Gr^{0.33}$$

и численно составлять единицы Вт/(м²К)

При очень плотной упаковке, что характерно для сыпучих материалов внутренний конвективный теплообмен незначителен, так как в микромалых объемах движения газа связаны молекулярными взаимодействиями. При этом, наряду с теплопроводностью увеличивается доля радиационной теплопередачи.

В общем виде влияние теплового излучения оценивается выражением:

$$\Phi = \alpha_{изл} \cdot S \cdot \Delta\theta,$$

$$\alpha_{изл} = E_{пр} \cdot \psi_{1,2} \cdot f(\theta_1, \theta_2).$$

Коэффициент облученности $\psi_{1,2}$, характеризующий пространственные характеристики элементов взаимного обмена, размеры, форму определяют, как правило, таблично и

графически с использованием теплофизических справочников. Этот коэффициент показывает, какая часть энергии, излучаемая телом 1, попадет на тело 2.

Автором предлагается аналитическая зависимость:

$$\psi_{1,2} = 1 - e^{-\frac{k}{r}} = 1 - e^{-0,33L_{мин}/\delta},$$

где $L_{мин}$ и δ – минимальный из размеров теплоприемника и расстояние до излучателя.

Важное значение в радиационной теплопередаче имеет приведенная степень черноты - $E_{пр}$. Для алюминия с гладкой поверхностью $E_{пр}=0,03$ (с окисленной поверхностью $E_{пр}=0,14$ для алюминиевых сплавов - до 0,25. Лаки и краски увеличивают степень черноты до 0,78 – 0,94. Идеальным вариантом для теплопередачи излучением являются черные теплоизлучательные коврики сделанные с применением резино-технических компонентов, в частности, разработанных профессором М. В. Халиным.

При работе приборов в полевых условиях следует учитывать тепловой поток солнечной радиации.

В современных технических средствах при высокоскоростных технологиях сушки зерна существенно возрастает влияние инерционных характеристик и резонансных явлений и колебаниям звеньев и всего механизма в целом.